

DOI: 10.16056/j.1005-7676.2016.02.018

# 地球物理方法在砂岩型铀矿找矿中的应用前景

银亚平<sup>1</sup>, 钱 鹏<sup>2,3</sup>

( 1. 东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330013; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 3. 东华理工大学 核工程与地球物理学院, 南昌 330013)

**摘 要:** 砂岩型铀矿作为铀矿藏的一种, 近年来随着对其成矿理论认识的不断深入以及地浸开采技术的引进极大降低了其开采成本, 逐渐成为我国铀矿藏的主要找矿方向。在总结砂岩型铀矿的成矿机理的基础上, 分析其在各类物探勘探方法的响应特征, 为地球物理方法在砂岩型铀矿勘探中的应用提供参考和借鉴。

**关键词:** 地球物理方法; 砂岩型铀矿; 成矿要素

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

文章编号: 1005-7676 ( 2016) 02-0074-04

## Geophysical Methods in the Application Prospect of Sandstone Type Uranium Deposit Prospecting

YIN Yaping<sup>1</sup>, QIAN Peng<sup>2,3</sup>

( 1. College of Earth Science, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Institute of Geology, China Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. School of Nuclear Engineering and Geophysics, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Sandstone type uranium deposit as one of the hidden uranium deposits, in recent years, with the deepening of the understanding of its metallogenic theory and the introduction of in-situ leaching mining technology greatly reduce the mining cost. It has gradually become the main prospecting direction of hidden uranium deposits in China. This article will be concluded on the basis of the mineralization mechanism of the sandstone type uranium deposit, to analyze its in all kinds of response characteristics of the geophysical exploration methods, for geophysical method in exploration of sandstone type uranium deposit application provide reference.

**Key words:** geophysical methods; sandstone type uranium deposit; ore-forming elements

### 引言

铀作为一种清洁高效的能源, 如今早已不仅限于建造国防核武器, 随着科技的发展, 其被更加广泛的应用于国民经济发展和建设之中。砂岩型铀矿作为铀矿藏的一种, 是世界最早发现的铀矿床类型之一, 也是世界上分布最广的铀矿床类型。其

具有易于开采和选冶等特点, 尤其是在矿石胶结程度较差的情况下, 还可采用溶液采矿法 ( 即地浸法) 以降低开采成本, 具有极大的工业意义。据国际原子能机构 ( IAEA, 1996) 对全球 528 个成型的铀矿床统计, 砂岩型铀矿 250 个, 占总数 42.90%, 位居首位。在我国, 20 纪 90 年代以前, 砂岩型铀矿已成为我国具有工业意义的 4 大类型 ( 花岗岩型、

收稿日期: 2016- 02- 25

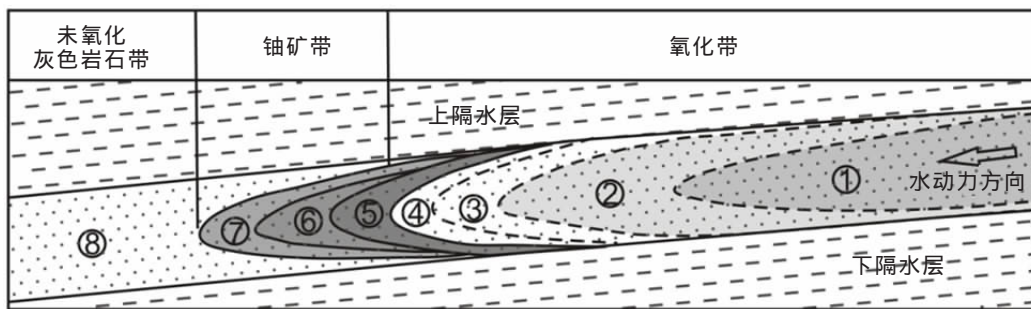
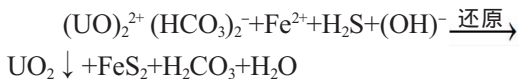
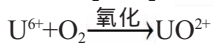
基金项目: 江西省研究生创新专项资金资助项目 ( YC 2014-S326)

作者简介: 银亚平 ( 1990—), 女, 硕士研究生在读, 主要从事地球化学、地球物理研究工作。

火山岩型、砂岩型和碳硅泥岩型) 铀矿床之一, 并在数十年的找矿探索中, 成为我国铀矿地质找矿的主要找矿方向。

## 1 砂岩型铀矿的成矿要素分析

砂岩型铀矿 ( 特别是层间氧化带型) 的成矿必须经历 2 个阶段, 首先是赋矿主岩即渗透率较高的砂岩沉积成岩阶段。而后再由基底和蚀源区的富铀岩石经含氧大气水风化、淋滤将其中的四价铀元素 ( $U^{4+}$ ) 氧化为六价铀 ( $U^{6+}$ ) 并形成铀酰离子  $UO_2^{2+}$ , 当含氧含铀流体在运移过程中遇到含  $Fe^{2+}$ 、 $H_2S$  较多的还原性岩石即产生铀沉淀和富集。因此砂岩型铀矿必须在一定的地质条件下才能形成。



1. 完全氧化亚带; 2. 不完全氧化亚带; 3. 部分氧化亚带; 4. 褪色亚带;  
5. 古铀矿化亚带; 6. 贫铀亚带; 7. 铀的扩散亚带; 8. 未氧化灰色岩石带。

图 1 层间氧化带图<sup>[1]</sup>

富含的油气等还原物质运移也受断裂构造的影响。

### 1.1.3 盆地动力学

按盆地产出的大地构造位置可将盆地划分为: 克拉通盆地、前陆盆地、活动带内盆地, 其中以克拉通和活动带内盆地对砂岩铀矿形成条件最为有利。对于砂岩型铀矿, 铀成矿必须具备 2 个阶段: 早期赋矿砂体的形成→晚期活化构造产生。因此盆地动力学条件往往有个转制过程, 常表现为: 早期弱伸展 (主岩沉积时期) →晚期转为弱挤压 (成矿时期, 基底铀活化), 从而形成盆地双层结构。

## 1.2 沉积相与沉积体系

对于以后生成矿作用为主体的砂岩型铀矿而言, 必须考虑以下条件: 砂体的渗透性、成层性, 砂体间的连通性。砂岩型铀矿的赋矿砂体形成有多种沉积环境。

河流沉积体系是砂岩铀矿有利的沉积体系之一。以辫状沉积砂体间的连通和渗透性均较好, 成层性

## 1.1 构造条件

### 1.1.1 构造背景

合适的构造条件对砂岩型铀矿的成矿至关重要, 首先区域构造条件影响层间氧化带的形成, 层间氧化带指的是含氧地下水沿着不透水岩层之间的透水岩层向深部渗流, 使透水岩层发生氧化而形成的氧化带。层间氧化带形成的最佳有利地形为宽缓斜坡, 最主要构造特征是呈层状 (图 1)。同时砂岩作为砂岩型铀矿的富矿主岩, 形成的沉积环境相对稳定, 因此砂岩型铀矿形成的有利构造条件为稳定的构造背景下配合适当的构造升降, 与之相对应的即为次构造带区域。

### 1.1.2 断裂因素

根据水成铀矿理论, 砂岩型铀矿的形成与地表含铀含氧水对氧化带渗入紧密相关, 而多数地下水的渗入、渗出受断裂构造控制, 因此在断裂构造切穿地层部位往往更容易形成矿化富集。同时盆地内

也较好; 曲流河砂体虽然在剖面上曲流沉积常显示二元结构特征, 但实际上砂体间的连通是很差的, 砂体常被洪泛沉积的细碎屑岩所隔, 不利于后生成矿过程含铀含氧地下水的渗透运移。

三角洲沉积体系也是形成后生砂岩型铀矿化的主要沉积体系。其主要原因在于三角洲体系中发育席状砂体、分流河道砂体和河口砂坝砂体, 这些砂体的渗透性、连通性和成层性均较好, 虽然在三角洲沉积环境中形成的砂体常常缺乏有机质和还原物质, 但深部油气的二次还原作用弥补了自还原能力的不足。

### 1.3 古气候条件

古气候对成矿有多方面的影响。它影响岩石风化性质, 影响沉积岩层的成分, 特别是其中有机质的数量和分布直接影响到铀的表生迁移和富集、地下水的性质和铀浓度等。

潮湿的气候条件虽然有利于岩石的化学风化和

铀的浸出,但植被和粘土矿物发育,铀在搬运途中易被吸附或局部还原而分散,一般不利于形成后生铀矿床。但在潮湿气候条件下形成的富含有机质或低品位矿化的还原性岩层,是形成后生铀矿床的有利前提。干旱、半干旱的交替气候有利于后生铀矿床的形成。岩石在旱季风化形成松散层,有利于地表水的淋滤,同时地表植被发育较差,粘土矿物较少,水中的铀免于分散,加上地下水位较低,氧化作用和水的淋滤作用加强,大量铀转入地下水中,高铀含量的水溶液进入上述潮湿气候条件下形成的或其他富含还原剂和吸附剂的岩层,经过较长时间的持续作用,就能形成一定规模的后生铀矿床。

#### 1.4 水文地质条件

对于自流盆地而言,交替存在2种地下水动力类型,即渗入型和渗出型。渗出型的水源位于盆地地下陷位置,受构造运动挤压由盆地中心向盆地边缘排挤,或者由地壳深部沿断裂向地表运移。而渗入型的供水区位于自流盆地边缘的隆起区,经由地表渗透或者断裂通道向盆地低洼区排泄,主要水源为大气降水。地浸砂岩铀矿只存在于渗入方式的成矿类型中且必须具备以下地质条件:

1) 透水岩层或构造破碎带处于开启状态,这样的透水岩层或构造破碎带可以接受大面积的含铀含氧地表水的渗入,有利于地下水与流经的岩石充分作用。

2) 成矿盆地处于相对缓慢上升过程。盆地只有在缓慢上升时,才较有利于含铀地下水的下渗,有利于岩石中铀的活化转移和形成较为稳定的氧化还原界面,促使铀的不断富集成矿。

3) 存在蓄水构造和滞水构造。含铀地下水要能够适当地减速并逐渐汇集起来,在适宜的蓄水构造

和滞水构造,如透镜状砂砾岩、断陷裂隙等处汇集。继而与岩石中的还原剂和吸附剂进行充分的互相作用,形成铀矿藏。

#### 1.5 铀源条件

形成砂岩型铀矿床的铀主要来自那些铀含量较高的岩石如花岗岩、中酸性火山岩、流纹质英安质火山碎屑岩以及某些含铀量较高的沉积岩和变质岩等。按照其在盆地不同产出空间位置可分为3类:1) 来自周围富铀隆起侵蚀区;2) 来自盆地基底的风化壳或基底岩体和地层;3) 来自盆地本身富铀沉积夹层或中酸性火山岩、凝灰岩等夹层。铀源区岩石必须具备铀含量高、活性铀多、分布面广等特点,同时需要在较为平缓的地壳运动构造下才能有足够的风化时间以便于足够的铀被淋滤出来。

#### 1.6 油气对砂岩型铀矿的影响

油气作为还原性物质,而砂岩型铀矿的富集成矿离不开氧化还原条件的控制,其对砂岩型铀矿的形成意义重大,尤其是在二者同处同一盆地的大环境下。因此研究盆地内的油-铀关系对寻找砂岩型铀矿显得十分必要。据统计世界已经探明的砂岩型铀矿床逾80%与已生产的油气田或煤田同盆共存<sup>[2]</sup>。而上述已发现和具有勘探潜力的含铀盆地,同时也是我国重要的油气、煤炭能源产地。

油气对铀矿体的还原沉淀主要通过由断层封闭油气藏沿封闭断裂烃向上微渗漏<sup>[3]</sup>,与上部富铀的层间氧化带(图2(a))或古河道含铀含氧砂岩(图2(b))相遇,形成砂岩中的还原带,继而产生铀矿沉淀。因此油气与砂岩型铀矿在储存空间上常表现为油气在下,铀矿在上的特征。形成时间表现为,先油后铀。此外对于背斜封闭油气藏,在油气藏下方与氧化带砂岩界面处形成铀矿床(图2(c))<sup>[4]</sup>。

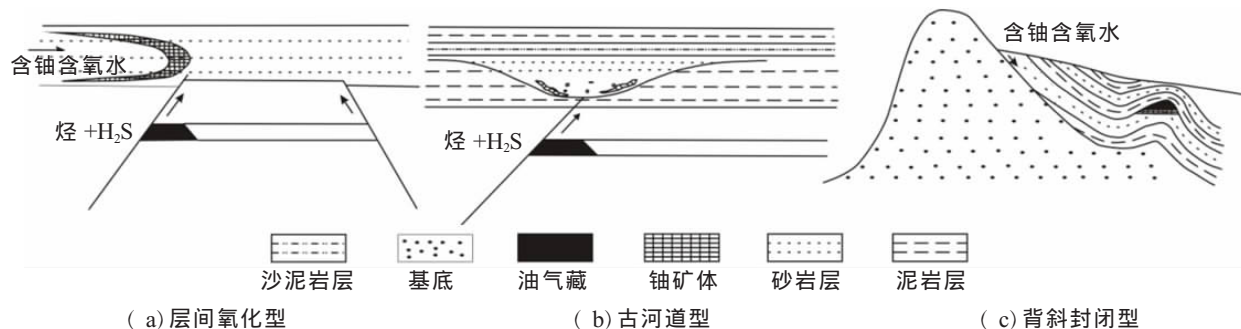


图2 油-铀关系图<sup>[4]</sup>

## 2 砂岩型铀矿的地球物理方法勘查技术

砂岩型铀矿品味一般为千分之几,埋藏深度介于几十米到几百米之间。因此地下的铀异常信息在

地表表现不明显,传统的放射性地球物理方法往往不能有效地应用于勘查砂岩型铀矿。国外通常采用以钻探为主的找矿方法需大量投资为前提显然不符合我国现阶段国情。因此有必要寻求其他有效的技



术手段应用于砂岩型铀矿的勘查。

地球物理勘查是应用物理的原理解决地学及矿产资源勘查问题的理论和方法。虽然除放射性地球物理勘查等之外的勘查方法不能直接用于查找砂岩型铀矿,但是可以通过地球物理勘探寻找有利于砂岩型铀矿成矿的构造,岩性岩相等地质条件,从而间接达到查找砂岩型铀矿的目的。

### 2.1 放射性测量

放射性勘探是最早使用的一种寻找铀矿的方法,其原理便是利用铀作为一种衰变核素的物理特征,通过航空和地面测量铀的衰变子体 $^{210}\text{Po}$ 、 $\gamma$ 射线以及天然热释光现象等可直接发现埋藏较浅,品位较高的铀矿藏。但对于今后将要寻找的埋藏较深,品位相对较低的砂岩型铀矿来说由于其覆盖层较深,地表缺乏明显的找矿标志且与成矿有关的信息微弱,其勘探效果并不明显。但是依旧能根据所获得的 $\gamma$ 能谱数据识别沉积盆地的浅部断裂,圈定铀矿化的范围并估算蚀源区铀的淋失量等。

### 2.2 重磁勘探

重力勘探进行勘查的前提条件是勘探目标具有密度差异。在砂岩型铀矿勘查中,含铀砂岩在密度上并无显著特征。但形成砂岩型铀矿的特殊地质构造条件能通过重力资料反映,例如砂岩型铀矿形成的有利构造条件为稳定的构造背景下配合适当的构造升降。而此类地形区域在布格重力异常上体现为位于重力场由高向低变化的梯度带上<sup>[7]</sup>。此外,重力方法还可勾画基底起伏、隐伏断层、古河道等对砂岩型铀矿成矿具有特殊地质意义的地下构造。

磁法勘探的依据为地质体的磁性差异,同样也无法对铀矿有直接的响应特征,但是盆地基底与覆盖层沉积物的重磁差异较大,因此,利用重磁勾划基底形态与寻找断裂构造是可行的。但在实际的资料解释中可能会出现重磁异常解释结果有差别的情况,当出现这种情况时,应当把两种方法的解释结合考虑,相互补充,以提高解释的可靠性。

### 2.3 电法勘探

电法勘探的依据为地下岩体、地质构造的电性差异。电法勘探应用于砂岩型铀矿勘查的有利因素主要有2方面:1) 沉积层与盆地基底电性差异较大,沉积层一般为低阻,盆地基底较沉积层为高阻,同时断裂构造在电阻率剖面上能有较好的体现。2) 氧化还原作用是形成矿体的必要先决条件,也是形成自然电位的直接原因,因氧化-还原环境的存在导致了天然原电池的产生,其在地表可引起明显的自

然电位异常,铀矿化大都分布在自然电场的高低过渡部位<sup>[5]</sup>。

在砂岩型铀矿勘查中,主要应用的方法有电测深、CSAMT、EH4电磁成像、自然电位、瞬变电磁法等。利用电测深方法可以根据沉积盖层与基底之间的电性差异勾画出凹陷轮廓<sup>[11]</sup>,CSAMT和EH4电磁成像方法在可地浸砂岩型铀矿床的勘查中能够准确反映盖层及基底的情况,查明成矿目的层的展布特征,圈定砂体范围,确定隐伏断裂构造位置、断层产状,并可清晰地分辨出泥-砂-泥地层结构,为砂岩型铀矿的区调提供可靠的依据<sup>[10,12]</sup>。除此自外,瞬变电磁法具有较好的空间分辨能力同时操作方便,不受地形限制,在古河道空间位置探测方面效果显著,可为我国其它地区的古河道型砂岩铀矿勘查提供借鉴<sup>[9]</sup>。

### 2.4 地震勘探

砂岩型铀矿作为一种沉积后生型矿藏,其成矿作用与沉积相、沉积体系密切相关。而地震勘探在划分地层、岩性、岩相、古河道以及砂体和断裂构造识别方面效果明显。在地震剖面上,反射波出现突变和错乱是断裂构造最明显的特征,古河道在地震剖面上表现为河谷位置下凹,两侧振幅增强。同时地震对砂泥分辨能力有位突出,砂岩相对泥岩通常表现为强波阻抗,对于沉积韵律较好的地层,在地震剖面上表现为纵向上不连续,甚至能直接从地震剖面上看出砂泥互层现象。因此利用反射地震勘探分析沉积相、沉积体系,圈定有利砂体并为下一步砂岩型铀矿勘探提供依据是可行的<sup>[6]</sup>。

此外结合最新的地震-测井联合反演预测储集层技术,利用测井数据对地震资料约束反演以提高反演精度。再通过拟合伽马-声波测井数据用以地震资料的参数反演更能直接得到含铀砂体的空间展布特征<sup>[8]</sup>。

### 2.5 测井技术

测井技术在核工业系统铀矿勘探工作中起到重要作用。地球物理测井作为砂岩型铀矿勘探最为准确、有效的地球物理方法,对砂岩型铀矿勘探起到比较重要的作用:1) 利用伽玛测井(自然伽玛测井、定量伽玛测井)等查找铀异常信息,识别铀异常层位;2) 通过对测井曲线的曲线形态分析、幅度分析等研究砂岩型铀矿的成矿环境。

## 3 结论

通过总结、分析砂岩型铀矿成矿特征与成矿规

(下转第 97 页)

压站与常规调压站相比有其独特的优势:

1) 国内大中型城市, 特别是一线城市, 土地资源紧张。燃气调压柜安装于地下, 可节省土地成本。

2) 调压柜安装在地上会产生一定程度的噪音污染, 特别是安装于小区域的楼栋调压柜发出的噪音会严重影响周围居民的生活质量。地下调压柜可以降低因设备运行产生的噪音污染。

3) 地下调压柜与普通安装于地上的调压柜相比, 能够减小因环境冲击对调压柜造成的危害。

4) 安装于路边的燃气调压柜, 存在碰撞损害的意外危害风险。如果把调压柜安装与地下, 则很好的规避了此风险。

## 5 结论

现阶段, 地下调压站还未得到广泛的应用。其结构强度和安全稳定性有待进一步优化。同时, 地

下调压站与普通调压站相比还存在建造成本高, 前期投入大, 施工复杂等弊端。但是地下调压站也有其独特的优势。从建造和使用方面来看, 地下调压站的应用更加符合未来城市发展的需求, 有着广阔的使用前景。

## 参考文献

- [1] 霍 军. 地下燃气调压设施的建设与管理[J]. 煤气与热力, 2002, 22(3): 247-248.
- [2] 姜林庆, 梁玉花. 开发利用地下监控调压箱的探讨[J]. 城市煤气, 1999(8): 17-19.
- [3] 李云军, 刘家友. 燃气调压站的安全技术措施[J]. 科技创新导报, 2010(3): 71-73.
- [4] 霍俊民, 孙建勋, 罗维昆, 等. 埋地式燃气调压装置的设计制造和应用[J]. 煤气与热力, 2003, 23(2): 83-85.
- [5] 赵杨文, 梁晓龙. 调压器在天然气行业中的应用[J]. 油气储运, 2003, 22(12): 44-46.

(上接第 77 页)

律, 并结合各类地球物理方法在地质勘探中的特点, 可以得到以下几条结论:

1) 断裂构造是油气、煤炭等能源矿藏中的还原性物质如  $H_2S$ 、烃类、炭屑、进入层间氧化地层的重要通道, 并借此形成氧化-还原过渡带进而促使铀的沉淀成矿。

2) 利用地球物理异常特征对砂岩型铀矿成矿环境进行解译, 描绘基底与沉积物 (主要是砂岩与泥岩) 形态, 分析沉积相特征, 可圈出砂岩型铀矿的有利成矿环境远景区域, 可提高砂岩型铀矿的找矿效率。

3) 在沉积盆地, 多种能源矿产资源 (油气、煤、铀) 同盆成藏, 可利用这些已有的资料结合砂岩型铀矿成矿理论, 为砂岩型铀矿找矿提供有力参考。针对目前砂岩型铀矿勘查方法比较单一的情况, 应该充分利用其他技术方法来勘查研究砂岩型铀矿。根据不同勘查目的, 选择合适的勘查方法。通过分析现有的油气、煤田地球物理勘探资料, 结合砂岩型铀矿的成矿理论, 以及其地质地球物理特征, 可为砂岩型铀矿的勘察提供新的思路。同时油田以及煤田勘探的资料在砂岩型铀矿勘探中的“二次利用”也将降低勘探成本, 提高经济效益。

## 参考文献

- [1] 王永和, 焦养泉, 吴立群. 从铀成矿条件分析西北地区砂岩

- 型铀矿找矿[J]. 西北地质, 2007(1): 72-82.
- [2] 刘池洋. 沉积盆地动力学与盆地成藏(矿)系统[J]. 地球科学与环境学报, 2008(1): 1-23.
- [3] 李 亮, 王永康, 张建晔. 在油气藏周围寻找砂岩型铀矿[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2001(5): 7-10.
- [4] 刘建军, 李怀渊, 陈国胜. 利用铀油关系寻找可地浸砂岩型铀矿[J]. 铀矿地质, 2006(1): 29-37.
- [5] 韩绍阳, 侯惠群, 腰善丛, 等. 我国可地浸砂岩型铀矿勘查方法技术研究[J]. 铀矿地质, 2004(5): 306-314.
- [6] 曾建纲, 聂逢君, 封志兵, 等. 二连盆地砂岩型铀矿找矿中的地球物理标识[J]. 金属矿山, 2014(5): 130-133.
- [7] 封志兵, 聂逢君, 江 丽, 等. 重力场特征与砂岩型铀矿的关系及地质意义[J]. 现代地质, 2014(4): 841-849.
- [8] 谈顺佳, 于常青, 聂逢君, 等. 有利含铀砂岩体的地球物理响应特征研究——以松辽盆地钱家店铀矿床为例[J]. 地球物理学进展, 2015(3): 1361-1370.
- [9] 方根显, 杨建春, 杨亚新. 瞬变电磁法在古河道型砂岩铀矿找矿中的应用[J]. 华东地质学院学报, 2003(4): 361-363.
- [10] 郭 晶, 汤洪志, 王 蔚. EH4 电磁成像系统在铀矿勘探中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2012(5): 522-525.
- [11] 刘清泉. 重力、电法资料在二连盆地区域构造研究中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 1987(4): 421-426.
- [12] 王志宏, 杨 进, 山科社. CSAMT 在可地浸砂岩型铀矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2005(3): 227-229.